

INFLUENZA DEL TRATTAMENTO SUPERFICIALE SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL DACRON® TNF 360

,S. Benfratello^a, A. Cirello^b, L. Palizzolo^a

^a Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale,
Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: salvatore.benfratello@unipa.it

^b Mi.Me. srl

Via delle Industrie, 8 90040 Isola delle Femmine, e-mail: design@doylesails.eu

Sommario

Nel lavoro si presentano i risultati di indagini sperimentali effettuate su campioni di tessuto in Dacron® TNF 360 con e senza trattamento superficiale. L'obiettivo è la caratterizzazione dell'effetto di tale trattamento sul comportamento costitutivo del tessuto ottenuto dalla tessitura di fili di polietilene tereftalato (PET). Le indagini sperimentali sono costituite da prove di trazione a controllo di spostamento con diverse velocità di carico su provini ricavati nelle direzioni della trama, dell'ordito ed inclinata a 45 gradi (bias). I risultati mostrano come il trattamento superficiale, oltre ad aumentare la resistenza ultima in tutte le direzioni, renda più rigido il comportamento costitutivo nelle direzioni dell'ordito e del bias con un effetto inverso nella direzione della trama. L'analisi di termogrammi dei provini nella direzione della trama mostra un comportamento omogeneo del materiale ed il ruolo del trattamento superficiale nel cambiare il comportamento del materiale.

Abstract

In the paper the results of experimental investigations on Dacron® TNF 360 specimens with and without surface treatment have been reported. Aim of the paper is to identify the role of the surface treatment on the constitutive behaviour of this woven, obtained by weaving polyethylene terephthalate (PET) yarns. The experimental investigations are constituted by tensile tests performed in displacement control and with different loading rate. The specimens investigated are obtained in the weft, warp and bias (45° inclined with respect to the weft direction) directions. The results show that the ultimate strength is incremented in all directions and that in warp and bias directions the constitutive behaviour of the treated woven is stiffer than the corresponding ones of the non-treated woven. In weft direction the effect is inverted. The analysis of thermograms of the specimens in weft direction shows an homogeneous behaviour confirming the role of the treatment on the material behaviour.

Parole chiave: Dacron, Legame costitutivo, Prove sperimentali, Termogrammi.

1. INTRODUZIONE

Sin dall'antichità [1] la navigazione a vela ha rappresentato la via principale per il trasporto merci e per la scoperta di nuove terre lontane. Oggigiorno, la navigazione a vela è relegata principalmente ad un ambito sportivo ma rappresenta altresì un campo dove lo sviluppo tecnologico (realizzazione di nuovi materiali, aerodinamica e idrodinamica) è di fondamentale importanza. Fino al secolo XIX il materiale utilizzato nella realizzazione delle vele era costituito da fibre naturali quali il lino ed il cotone. Da un punto di vista meccanico il lino è più resistente mentre il cotone è più leggero ma entrambi presentano gli inconvenienti di resistere poco ai raggi UV e di assorbire molta acqua. Da un

punto di vista del progetto della vela lo sviluppo aerodinamico dei primi anni del secolo XX ha determinato vele con rapporti di forma sempre più elevati; contemporaneamente lo sviluppo tecnologico in ambito industriale ha reso le fibre sintetiche (come quelle di poliestere) sempre più idonee all'uso in ambito velico da un punto di vista sia tecnico che economico, mettendo a disposizione dei velai una gran quantità di materiali differenti tra loro per caratteristiche anche meccaniche. E' noto che una vela e le sue prestazioni (specialmente in termini di velocità) sono strettamente legate a quelle della barca per la quale viene progettata e che una caratteristica fondamentale è la capacità della vela stessa di mantenere la propria forma nel tempo. Queste caratteristiche influenzano fortemente il progetto della vela ed in particolare la scelta del tessuto ed il modo con il quale i pannelli che compongono la vela sono assemblati tra loro. Seguendo lo sviluppo scientifico in ambito aerodinamico e di comportamento dei materiali, oggi il progetto di una vela viene effettuato secondo criteri di ottimizzazione cercando di sfruttare le caratteristiche di anisotropia dei tessuti utilizzati orientando i pannelli secondo la direzione della massima tensione. I modi di assemblare i pannelli più diffusi sono quello radiale, biradiale e full radial, per i quali la direzione di massima resistenza dovrebbe essere quella dell'ordito, mentre un modo alternativo e allo stesso tempo molto diffuso è quello cross-cut dove la direzione della trama è quella della balumina o caduta poppiera della vela. Un aspetto importante da sottolineare è che la vela è una forma tridimensionale "attiva" nel senso che è soggetta a condizioni di vento e di mare anche molto variabili durante la stessa regata e quindi è di fondamentale importanza che anche lungo le altre direzioni caratteristiche dei tessuti (trama e bias, solitamente a 45° rispetto alla trama) la resistenza sia tale da consentire il mantenimento della forma. Tra le fibre sintetiche disponibili in ambito velico, per le caratteristiche meccaniche e per il loro prezzo, quelle di polietilene tereftalato (PET, il cui nome commerciale è Dacron®) sono le più utilizzate. Il tessuto in Dacron® presenta caratteristiche meccaniche differenti nelle direzioni della trama e dell'ordito e, come tutti i tessuti, una forte debolezza in direzione bias. E' importante sottolineare che le vele in Dacron® sono solitamente realizzate secondo il modo cross-cut per il quale è importante che il materiale possieda buone caratteristiche meccaniche anche nelle direzioni della trama e del bias; per raggiungere tale scopo le industrie realizzano tessuti con fili per la trama e per l'ordito di differenti caratteristiche geometriche e meccaniche. Un ulteriore approccio che le industrie specializzate nel settore hanno messo a punto per migliorare le caratteristiche generali (e quindi anche quelle meccaniche) delle vele è la applicazione di trattamenti superficiali differenti tra loro per le caratteristiche tecnologiche che li contraddistinguono. Scopo del lavoro è analizzare l'effetto del trattamento superficiale sul comportamento meccanico di un tessuto in Dacron® TNF 360 (il numero rappresenta il peso in grammi di un metro quadrato di tessuto) disponibile in ambito commerciale. A tal fine, il tessuto con e senza trattamento superficiale viene dapprima esaminato da un punto di vista geometrico per poi essere sottoposto a prove di trazione eseguite secondo le indicazioni della normativa internazionale vigente. L'analisi del comportamento del tessuto viene integrata da una prima analisi del comportamento termico durante le prove di trazione utilizzando una termocamera FLIR. I tessuti (con e senza trattamento) dai quali sono stati preparati i campioni utilizzati nel presente lavoro sono stati forniti dalla Dimension-Polyant GmbH.

2. ANALISI SPERIMENTALE

La varietà di tessuti in Dacron® disponibile in ambito commerciale è molto vasta; di conseguenza la scelta del tessuto da analizzare è stata effettuata in accordo con Dimension-Polyant (DP) GmbH che ha fornito il materiale. La attenzione è stata posta, come detto in precedenza, sul Dacron® TNF 360 per il suo largo impiego in ambito velico. La DP ha specificato che tale tessuto è disponibile con un solo tipo di trattamento superficiale, denominato impregnante e costituito fondamentalmente da una fase di calandratura successiva ad un bagno in resina melamminica. La intensità della fase di calandratura, che costituisce una delle variabili tecnologiche di questo tipo di trattamento regolando la percentuale di resina melamminica presente nel prodotto finito e quindi influenzando fortemente il livello di rigidità ottenuto, per questo tipo di tessuto è una sola, e la DP classifica il trattamento come medio a livello di rigidità finale e lo denomina MTO. Il primo passo è stato quindi quello di determinare la percentuale di resina melamminica confrontando il peso di due provini di uguale dimensioni ricavati dalle due pezze di tessuto fornite dalla DP. La bilancia utilizzata è stata una Sartorius ED 22025-CW (sensibilità pari a 0.01 g) ed i risultati ottenuti hanno mostrato come il tessuto trattato sia più pesante

del 10% rispetto a quello non trattato. Il secondo passo è stato quello di analizzare al microscopio ottico i due tessuti. Il microscopio utilizzato è un Leica MS5 equipaggiato con una fotocamera Kodak DC180 e relativo software. Nelle Figure 1a e 1b sono riportate le fotografie della superficie dei campioni, rispettivamente nel caso di tessuto non trattato (Figura 1a) e trattato MTO (Figura 1b). Un confronto di tali figure mostra chiaramente che nel caso del tessuto non trattato i fili di trama ed ordito appaiono ben separati e ben definiti, cosa che – invece – non si verifica nel caso del tessuto trattato. L'effetto del trattamento superficiale è ulteriormente visibile dall'analisi al microscopio delle sezioni trasversali nella direzione della trama (Figure 2) ed in quella dell'ordito (Figure 3).

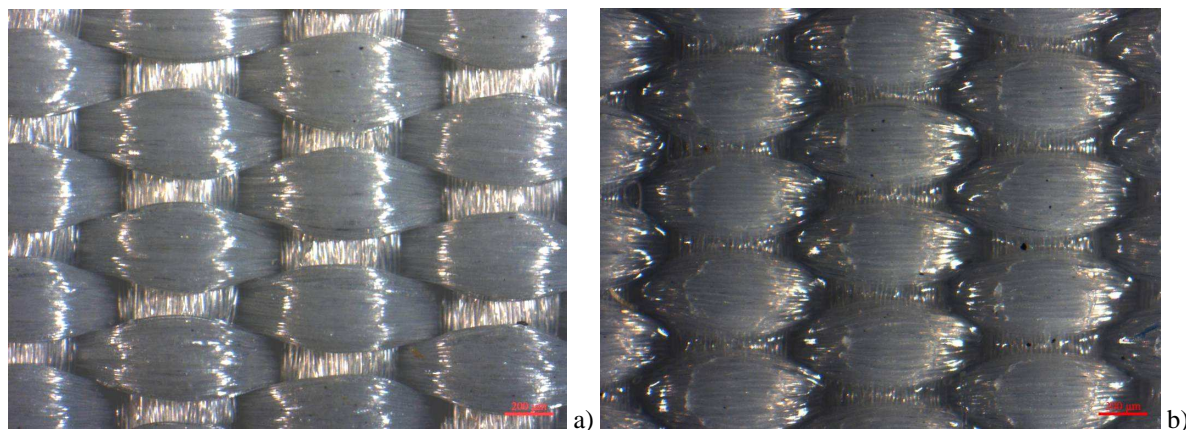


Figura 1: Fotografie al microscopio ottico della superficie del tessuto (ingrandimento 40x)- a) tessuto non trattato; b) tessuto trattato MTO.

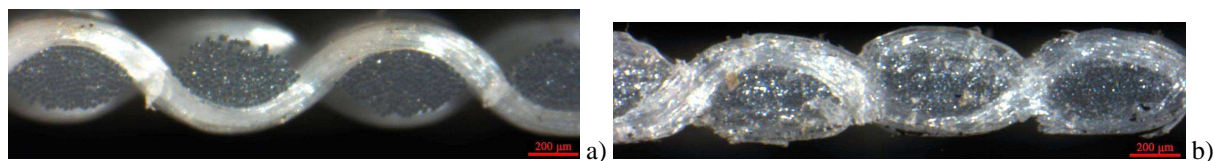


Figura 2: Fotografie al microscopio ottico della sezione trasversale del tessuto nella direzione della trama (ingrandimento 40x) - a) tessuto non trattato; b) tessuto trattato MTO.

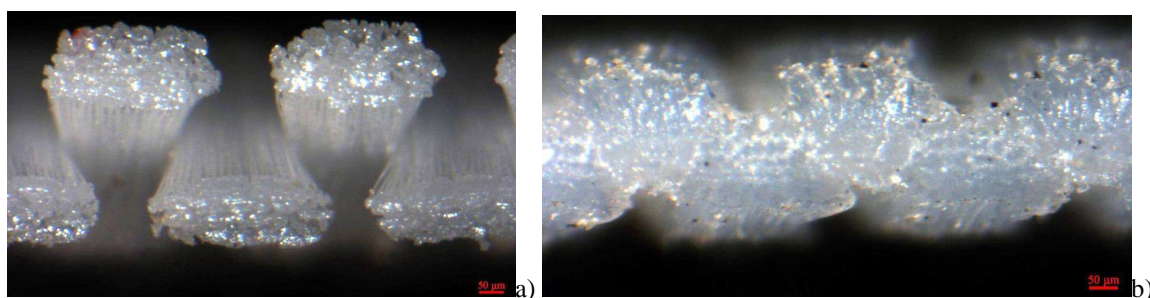


Figura 3: Fotografie al microscopio ottico della sezione trasversale del tessuto nella direzione dell'ordito (ingrandimento 40x) - a) tessuto non trattato; b) tessuto trattato MTO.

Un esame di queste immagini conferma l'effetto descritto in precedenza, dal momento che le immagini del tessuto trattato mostrano un materiale più compatto con un'evidente presenza della resina melamminica tra i fili ed all'interno delle matassine. La misura dello spessore dei due tessuti conferma quanto detto in precedenza: il tessuto non trattato presenta uno spessore pari a 0.44 mm mentre quello trattato pari a 0.38 mm, con un decremento di circa il 14%. L'analisi delle figure 5 mostra anche che la forma dei fili di trama è quella tipica lenticolare riportata in letteratura [2,3]; effettuando la misura degli assi principali di questa forma lenticolare si ottiene che il tessuto trattato presenta una riduzione di tali assi pari all'11% per l'asse maggiore e pari al 21% per quello minore. Il rapporto tra la lunghezza dell'asse maggiore e quella dell'asse minore nel caso in esame è pari a 1.95 per il tessuto non trattato e pari a 2.20 per il tessuto trattato; quest'ultimo valore è maggiore del limite riportato in letteratura [4], confermando come il trattamento superficiale comporti una forte riduzione

dello spazio tra i fili. Il passo successivo è stato quello di caratterizzare il comportamento costitutivo dei due tessuti utilizzando una prova di trazione. Le prove di trazione sono state effettuate utilizzando la macchina universale Zwick&Roell Z600 gestita dal software TextXpert v11.02 in dotazione al laboratorio del DICA. I provini utilizzati sono rappresentati da strisce di tessuto di larghezza pari a 50 mm e lunghezza pari a 300 mm, conformi a quanto prescritto dalla UNI EN ISO 13934-1, 2000 [5]. La normativa citata suggerisce di adottare uno spessore di gomma da incollare sul materiale che viene introdotto tra le ganasce della macchina prova materiali, al fine di evitarne lo scivolamento. Nella Figura 4 vengono riportate le fotografie del provino senza e con lo spessore di gomma (incollato con una resina poliesteri) insieme ad una fotografia di insieme del set-up sperimentale.

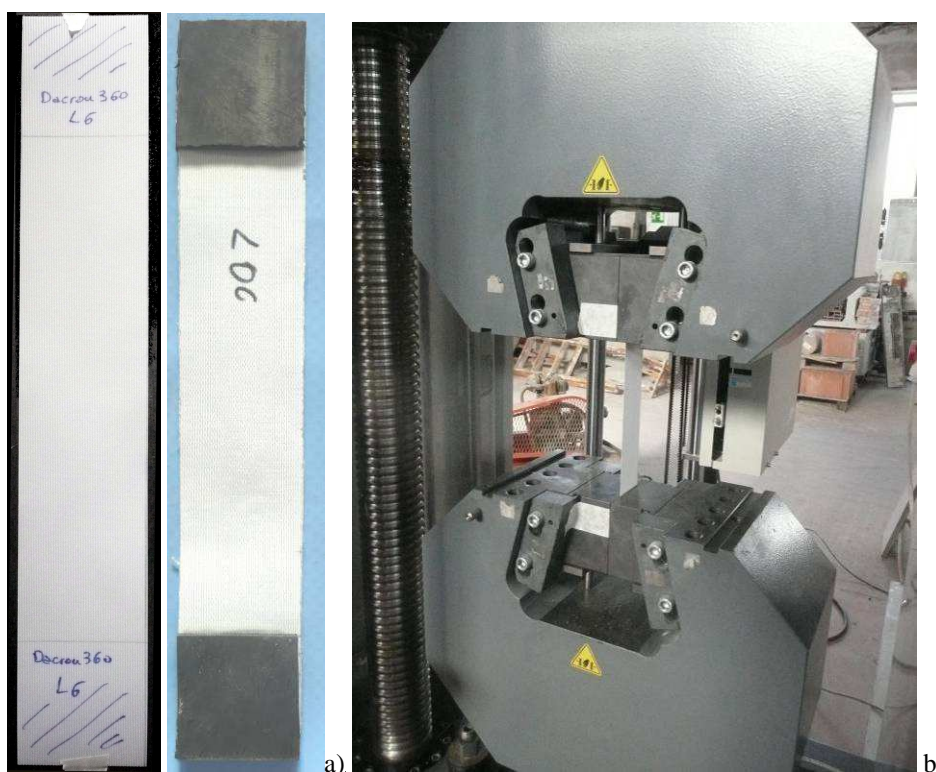


Figura 4: a) provino utilizzato senza e con gli spessori di gomma; b) set-up sperimentale.

Al fine di valutare il comportamento costitutivo del materiale è necessario determinare la tensione agente definendo opportunamente la sezione trasversale che, per quanto detto in precedenza, non risulta particolarmente semplice. In letteratura [6,7] si è soliti superare il problema della corretta definizione della sezione trasversale, riportando i risultati in termini del rapporto tra la forza applicata e la densità lineare di massa del tessuto. Tuttavia questa scelta non è coerente dal punto di vista meccanico con gli obiettivi del lavoro e quindi si è scelto di adottare come sezione trasversale quella rettangolare circoscritta alla sezione reale, ottenendo un risultato approssimato ma sottostimato rispetto a quello reale. Le prove di trazione sono state eseguite secondo le prescrizioni previste dalla normativa [5] con una lunghezza libera tra le morse della macchina universale pari a 200 mm ed eseguendo le prove in controllo di spostamento con un precarico pari a 10 N e con differenti velocità di carico ($v_1 = 0.5$ mm/min; $v_2 = 5$ mm/min; $v_3 = 50$ mm/min) per verificare la dipendenza del comportamento costitutivo del materiale dalla velocità di carico. Sono stati preparati tre provini per ciascuna direzione da testare (trama, ordito e bias, a 45° rispetto alla direzione della trama) e la ripetibilità dei risultati è stata verificata testando un ulteriore insieme di provini i cui risultati differivano dai precedenti per motivi ascrivibili agli errori intrinseci dovuti alla preparazione dei provini stessi ed all'inserimento tra le morse, e quindi confermando in pieno gli andamenti ottenuti. In Figura 5 sono riportati i risultati delle prove di trazione ottenuti nella direzione della trama in termini di tensione nominale verso deformazione nominale. Un esame di questa figura mostra chiaramente che per tutti i casi esaminati (sia nel caso di tessuto non trattato che trattato) l'andamento di queste curve può essere diviso in tre regioni differenti: la prima con una concavità verso il basso, la seconda con la

concavità verso l'alto e la terza con la concavità nuovamente verso l'alto. Mentre la prima regione ($0 \leq \text{deformazione} \leq 0.02$), caratterizzata da un andamento quasi lineare, è molto simile in tutti i casi, lo stesso non si può dire per la seconda regione. Come è facile dedurre, in tutti i casi del tessuto trattato la seconda regione è più larga (lungo l'asse della deformazione) rispetto alle curve corrispondenti del tessuto non trattato. Ciò dimostra che il trattamento superficiale nella direzione della trama ha l'effetto di aumentare la deformabilità del materiale.

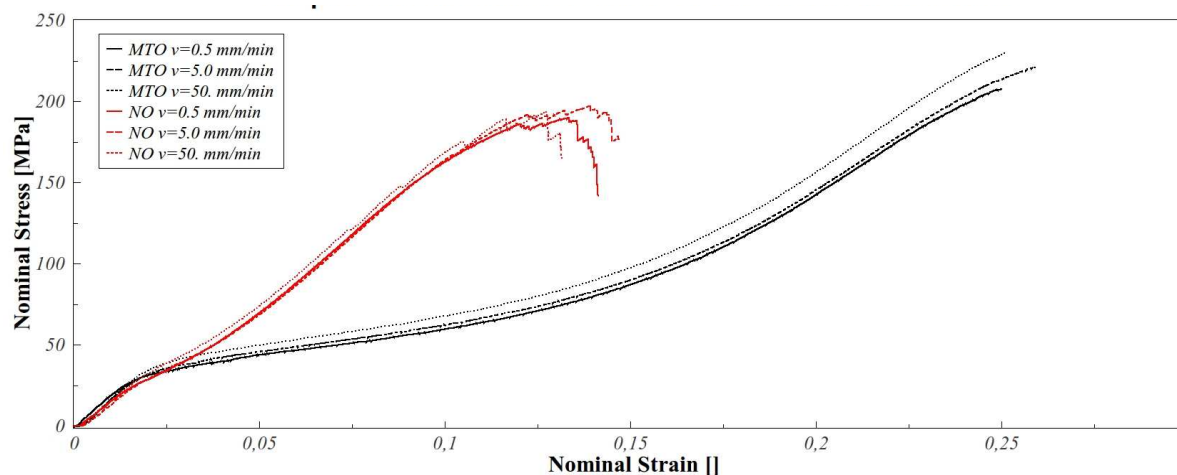


Figura 5: Risultati della prova di trazione nella direzione della trama: (nero) tessuto trattato MTO; (rosso) tessuto non trattato.

La terza regione non è molto estesa in tutti i casi esaminati ma si può affermare che la concavità mostrata dal tessuto non trattato è maggiore di quella mostrata dal tessuto trattato. Considerando in dettaglio la prima regione si può assumere che il modulo di Young del tessuto trattato sia pari a circa 2 GPa, leggermente superiore a quello del tessuto non trattato, dimostrando che un effetto del trattamento è quello di incrementare, seppur non di molto, il modulo di Young. Da un punto di vista generale, si può affermare che la resistenza ultima del tessuto trattato è di circa il 10% maggiore di quella del tessuto non trattato, mentre la deformazione ultima del tessuto non trattato è pari al 50% di quella del tessuto trattato. Tali risultati confermano l'effetto positivo del trattamento superficiale sulla resistenza ultima ma mostrano un comportamento maggiormente deformabile del tessuto trattato. Un'ulteriore osservazione da fare è che in tutti i casi esaminati la rottura del tessuto trattato è stata di tipo fragile ed il provino si è rotto completamente mentre nel caso del tessuto non trattato la rottura è stata in generale più lenta partendo da un lato del provino ed andando progredendo verso il lato opposto, come confermato dalle curve in rosso nella Figura 5. Come era da aspettarsi i risultati mostrano anche una evidente, seppur non molto elevata, influenza della velocità di incremento del carico sul comportamento costitutivo del materiale. Da un punto di vista energetico è importante sottolineare che la energia di deformazione mostrata dal tessuto trattato è maggiore di quella del tessuto non trattato e ciò è da ascrivere alla già citata maggiore deformabilità del tessuto trattato. Infine, si vuole sottolineare che la forma delle curve tensione nominale – deformazione nominale dei casi esaminati è molto simile a quella presentata in [8] anche se nei casi esaminati le curve non presentano un tratto iniziale di grande elongazione in corrispondenza di piccoli incrementi di carico.

In Figura 6 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di trazione nella direzione dell'ordito, sempre in termini di tensione nominale verso deformazione nominale. Un esame di questa figura mostra immediatamente che il comportamento costitutivo del tessuto trattato è molto differente da quello del tessuto non trattato. È importante sottolineare che il comportamento costitutivo mostrato nella direzione dell'ordito è completamente diverso da quello presentato in precedenza nella direzione della trama, a conferma anche della marcata ortotropia dei tessuti in esame. Nello specifico è evidente che la seconda regione che caratterizza il comportamento del tessuto trattato presenta un andamento prettamente lineare, mentre per il tessuto non trattato la prima regione è praticamente assente. Approfondendo il comportamento nel tratto iniziale, il modulo di Young del tessuto trattato può essere valutato pari a circa 0.8 GPa, mentre quello del tessuto non trattato pari a circa 0.2 GPa. Tale risultato,

insieme all'andamento generale della curva tensione nominale – deformazione nominale mostra chiaramente come nella direzione dell'ordito l'effetto del trattamento superficiale sia chiaramente e fortemente positivo sotto tutti gli aspetti. Infatti anche la resistenza ultima del tessuto trattato è superiore (circa il 20%) a quella del tessuto non trattato a parità (o quasi) di ampiezza dell'intervallo di deformazione (in realtà quello del tessuto trattato è leggermente superiore). Il comportamento a rottura è analogo a quanto descritto nel caso dei risultati delle prove nella direzione della trama e l'energia di deformazione del tessuto trattato è evidentemente superiore a quella del tessuto non trattato.

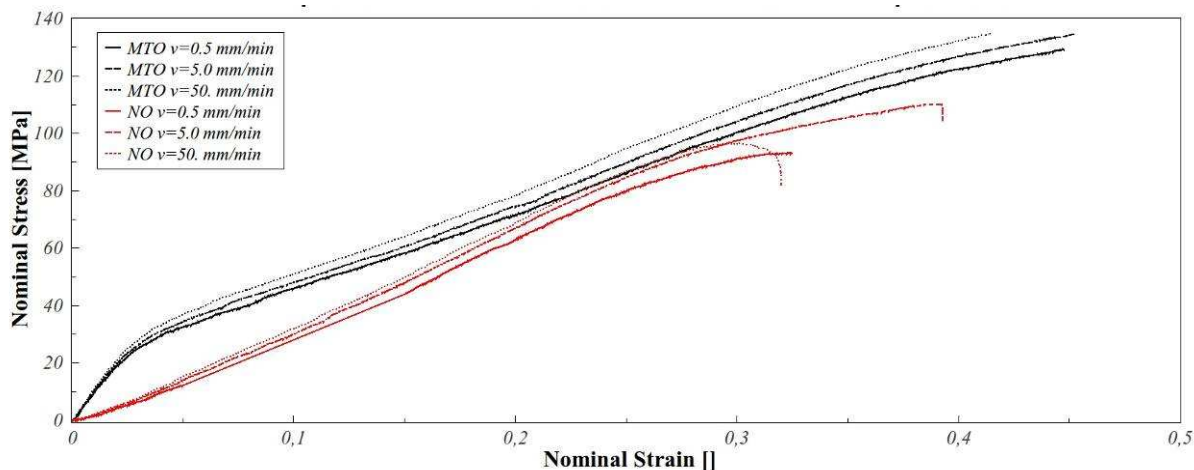


Figura 6: Risultati della prova di trazione nella direzione dell'ordito: (nero) tessuto trattato MTO; (rosso) tessuto non trattato.

In Figura 7 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di trazione nella direzione del bias, sempre in termini di tensione nominale verso deformazione nominale. Un esame di questa figura mostra chiaramente che, così come già evidenziato nella analisi dei risultati delle prove di trazione nella direzione dell'ordito, i due tessuti mostrano un comportamento completamente differente l'uno dall'altro. In particolare si può osservare che il comportamento del tessuto trattato è analogo a quello dello stesso tessuto nella direzione dell'ordito con una terza regione praticamente assente. D'altro canto il tessuto non trattato mostra un comportamento completamente differente sia da quello mostrato nella direzione della trama sia da quello nella direzione dell'ordito. Nel caso del tessuto non trattato è evidente la presenza di una parte iniziale caratterizzata da un elevato incremento della deformazione per piccoli incrementi di carico. Ancora, la curva tensione nominale – deformazione nominale è caratterizzata solamente da una concavità verso l'alto. I moduli di Young desumibili da una analisi dei tratti iniziali delle curve sono pari a 0.05 GPa nel caso del tessuto non trattato e a 0.5 GPa per il tessuto trattato. Come già osservato nel caso delle prove nella direzione dell'ordito, la tensione di rottura del tessuto trattato è più elevata di circa il 25% rispetto a quella del tessuto non trattato, l'ampiezza dell'intervallo della deformazione è leggermente superiore (circa il 20%) nel caso del tessuto trattato e le modalità di rottura sono analoghe a quelle descritte in precedenza.

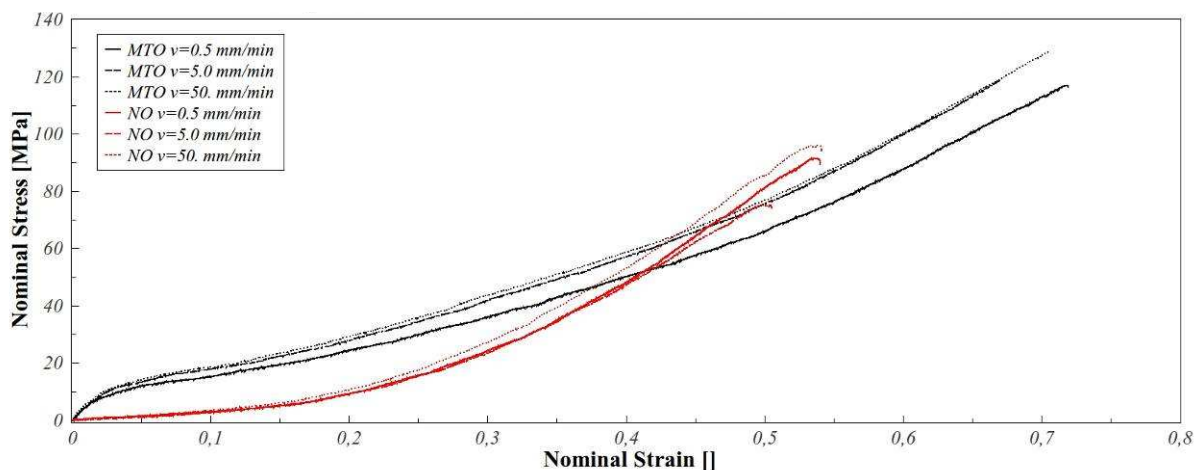


Figura 7: Risultati della prova di trazione nella direzione del bias: (nero) tessuto trattato MTO; (rosso) tessuto non trattato.

Al fine di approfondire la conoscenza del comportamento dei due materiali in esame e l'influenza del trattamento superficiale alcune prove di trazione effettuate sono state riprese con una termocamera FLIR modello SC-660, caratterizzata da una risoluzione pari a 640x480 pixel ed una sensibilità termica $< 30\text{mK}$, in dotazione al laboratorio del DICA. Le dimensioni della termocamera non sono risultate compatibili con gli spazi disponibili tra il provino e le colonne della macchina universale Z600; a causa di ciò non è stato possibile effettuare una ripresa frontale del provino durante la prova di trazione bensì una inclinata. In Figura 8 è riportata una fotografia del set-up presa con la fotocamera digitale in dotazione alla termocamera. L'obiettivo di tale analisi non era quello di caratterizzare le proprietà termiche dei materiali costituenti i tessuti, bensì verificare il comportamento dei materiali durante le prove di trazione e confrontarli tra loro in modo tale da identificare l'eventuale influenza del trattamento superficiale. Per quanto appena detto non è stata effettuata la calibrazione della termocamera prima della registrazione, ed è stata fissata una emissività pari a 0.95. La frequenza di acquisizione è stata di 10 immagini al secondo. Per motivi di brevità si è scelto di riportare nel presente lavoro solamente il confronto tra il comportamento dei due tessuti nel caso della prova di trazione nella direzione della trama. Il confronto è stato effettuato a parità di tensione nominale presente nel provino e, visto che entrambi i tessuti raggiungono i 200 MPa, si è scelto di confrontare i termogrammi in corrispondenza di 100 MPa, 150 MPa e 200 MPa, i quali sono riportati nelle Figure 9-11. Un esame di queste immagini conferma come il trattamento superficiale cambi il comportamento del materiale. Infatti a parità di tensione nominale agente (100 MPa e 150 MPa) il tessuto non trattato appare più freddo rispetto a quello trattato. In corrispondenza della tensione nominale di 200 MPa i due tessuti mostrano una temperatura analoga ma è da sottolineare che il tessuto non trattato è prossimo alla rottura mentre quello non trattato no; questa differenza di comportamento è evidentemente da ascrivere al trattamento superficiale. Al fine di approfondire la conoscenza del comportamento in fase di rottura, al quale si è già fatto riferimento, nelle Figure 12 sono riportati due termogrammi in sequenza della fase di rottura dei due tessuti in esame. Come già detto in precedenza e come è facile dedurre da un esame di queste immagini, il tessuto non trattato mostra una modalità di rottura "lenta" e graduale rispetto a quella del tessuto trattato che appare praticamente istantanea. In entrambi i casi, come è lecito aspettarsi, si può notare un incremento di temperatura nella zona del provino prossima alla rottura, con un elevato incremento di temperatura nella zona interessata dalla rottura. Anche in questo caso appare evidente il ruolo svolto dal trattamento superficiale nel comportamento dei materiali in esame.

3. CONCLUSIONI

Nel lavoro sono stati presentati i risultati di alcune indagini sperimentali finalizzate alla identificazione del ruolo del trattamento superficiale nel comportamento meccanico del tessuto in Dacron® 360. Le indagini svolte, effettuate su strisce di tessuto conformi alle prescrizioni della normativa vigente, sono state sia di tipo ottico, per definire gli effetti geometrici sulla struttura del tessuto, sia di tipo meccanico (prove di trazione), per definire il comportamento costitutivo. Data la intrinseca ortotropia del tessuto, i provini esaminati sono stati ricavati – per entrambi i tessuti – secondo le tre direzioni principali: quella della trama, quella dell'ordito e quella del bias, essendo quest'ultima inclinata a 45° rispetto a quella della trama. Le indagini ottiche, effettuate con un microscopio ottico, mostrano chiaramente il cambiamento di struttura del tessuto dopo il trattamento superficiale sia in termini geometrici (dovuti alla fase di calandratura) che di compattezza del materiale (dovuta sia alla fase di calandratura che alla presenza della resina melamminica). Le indagini meccaniche hanno messo in evidenza come il trattamento superficiale migliora il comportamento costitutivo del tessuto nel senso che la tensione e la deformazione di rottura, la densità di energia di deformazione ed il modulo di Young sono maggiori rispetto al caso del tessuto non trattato. In particolare si è messo in evidenza come nella direzione della trama la curva tensione nominale – deformazione nominale del tessuto trattato, dopo un primo tratto nel quale risulta essere al di sopra di quella del tessuto non trattato, per la maggior parte si trovi al di sotto di quella del tessuto non trattato. Questo indica come nella direzione della trama, dopo una prima fase, il tessuto trattato sia più deformabile di quello non trattato. Questo aspetto potrebbe avere un risvolto importante nella capacità del materiale di mantenere la forma della

vela. Le considerazioni presentate sono anche confermate dalle immagini delle prove di trazione acquisite con una termocamera.

Gli sviluppi del presente lavoro che si voglio perseguire nel prossimo futuro sono rappresentati dall'approfondimento delle analisi effettuate utilizzando metodi non a contatto come quelli rappresentati dall'analisi termica e dalla analisi speckle o dalla digital image correlation. Un aspetto importante che è già in fase di studio è il ruolo di differenti trattamenti superficiali sullo stesso tessuto. Infine si vuole portare avanti anche lo studio della modellazione numerica del comportamento costitutivo finalizzata alla progettazione ottimale della vela.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori sono grati al Sig. Erasmo Cataldo del DICA per il supporto nello svolgimento delle prove sperimentali. Gli autori ringraziano la Dimension-Polyant GmbH, ed in particolare il sig. Robert Kuhnen per il contributo fondamentale nella realizzazione della presente ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Carter, Robert, "Boat remains and maritime trade in the Persian Gulf during the sixth and fifth millennia BC", *Antiquity*, 80, 307, (March 2006).
- [2] F. T. Peirce, "The geometry of cloth structure", *J. Text. Inst.*, 28, T45-96, (1937)
- [3] W.J. Shanahan, D. W. Lloyd and J.W.S. Hearle, "Characterizing the elastic behavior of textile fabrics in complex deformations", *Text. Res. J.*, 48(15), 495 (1978).
- [4] N. Pan, "Analysis of woven fabric strengths: prediction of fabric strength under uniaxial and biaxial extensions", *Computer Science Technology*, 56, 311-327, (1996).
- [5] UNI EN ISO 13934-1 (2000). Textiles - Tensile properties of fabrics - Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method.
- [6] J. Hu, *Structure and mechanics of woven fabrics*, CRC Press, (2004), ISBN 0849328268.
- [7] X. Q. Peng, J. Cao, "A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composites fabrics", *Composites. Part A: Applied science and manufacturing*, 36, 859-874 (2005).
- [8] H. Gabrijelčić, E. Černoša, K. Dimitrovski, "Influence of weave and weft characteristics on tensile properties of fabrics", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 16(2), 45 (2008).



Figura 8: Fotografia digitale del set-up sperimentale ottenuta dalla termocamera.

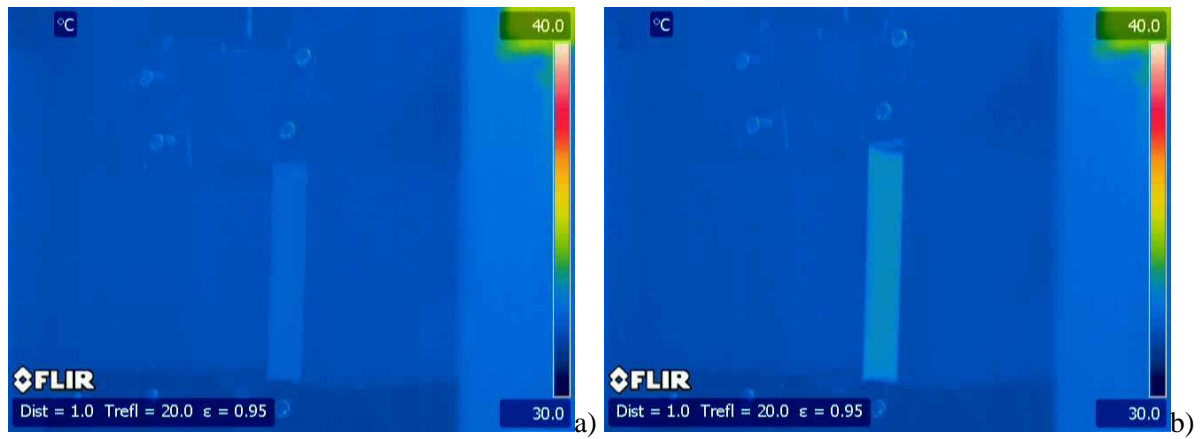


Figura 9: Termogrammi ad una tensione nominale di 100 MPa: a) tessuto non trattato; b) tessuto trattato MTO.

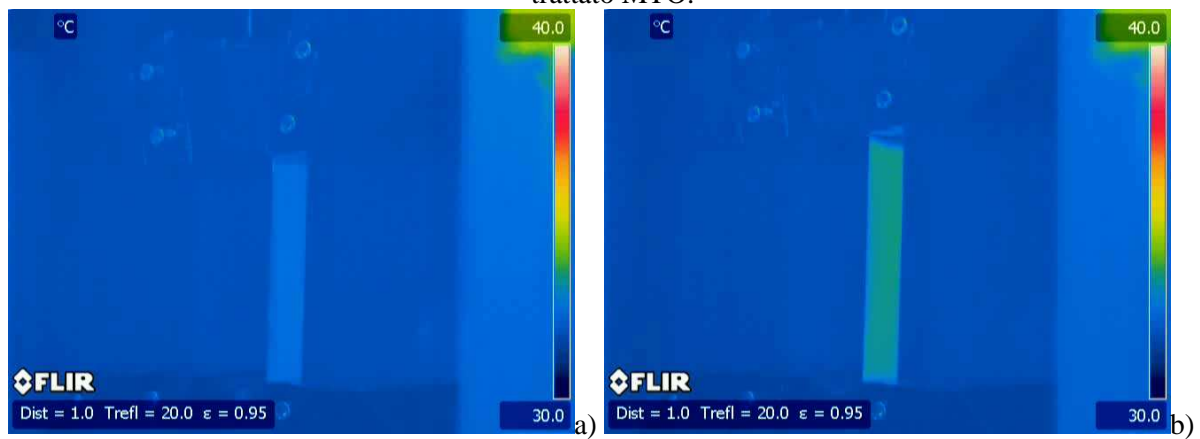


Figura 10: Termogrammi ad una tensione nominale di 150 MPa: a) tessuto non trattato; b) tessuto trattato MTO.

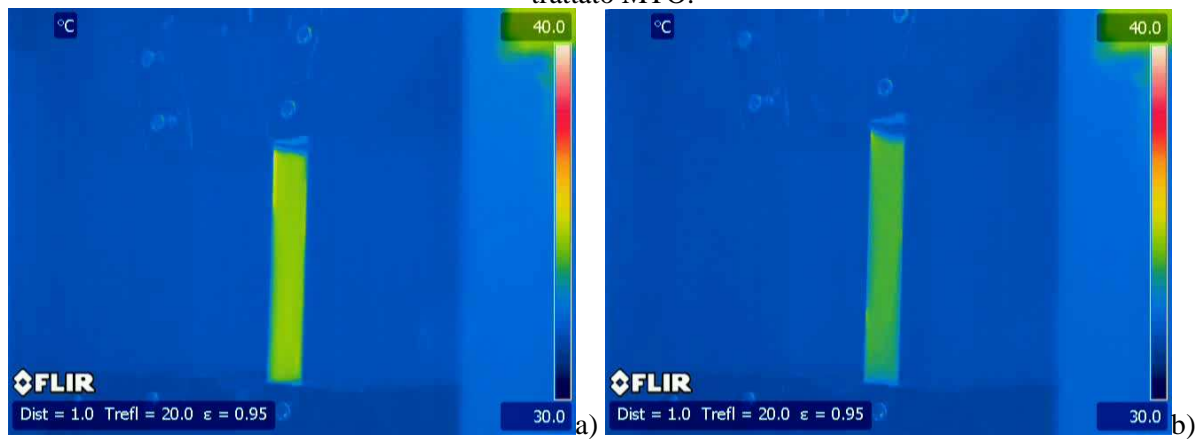


Figura 11: Termogrammi ad una tensione nominale di 200 MPa: a) tessuto non trattato; b) tessuto trattato MTO.

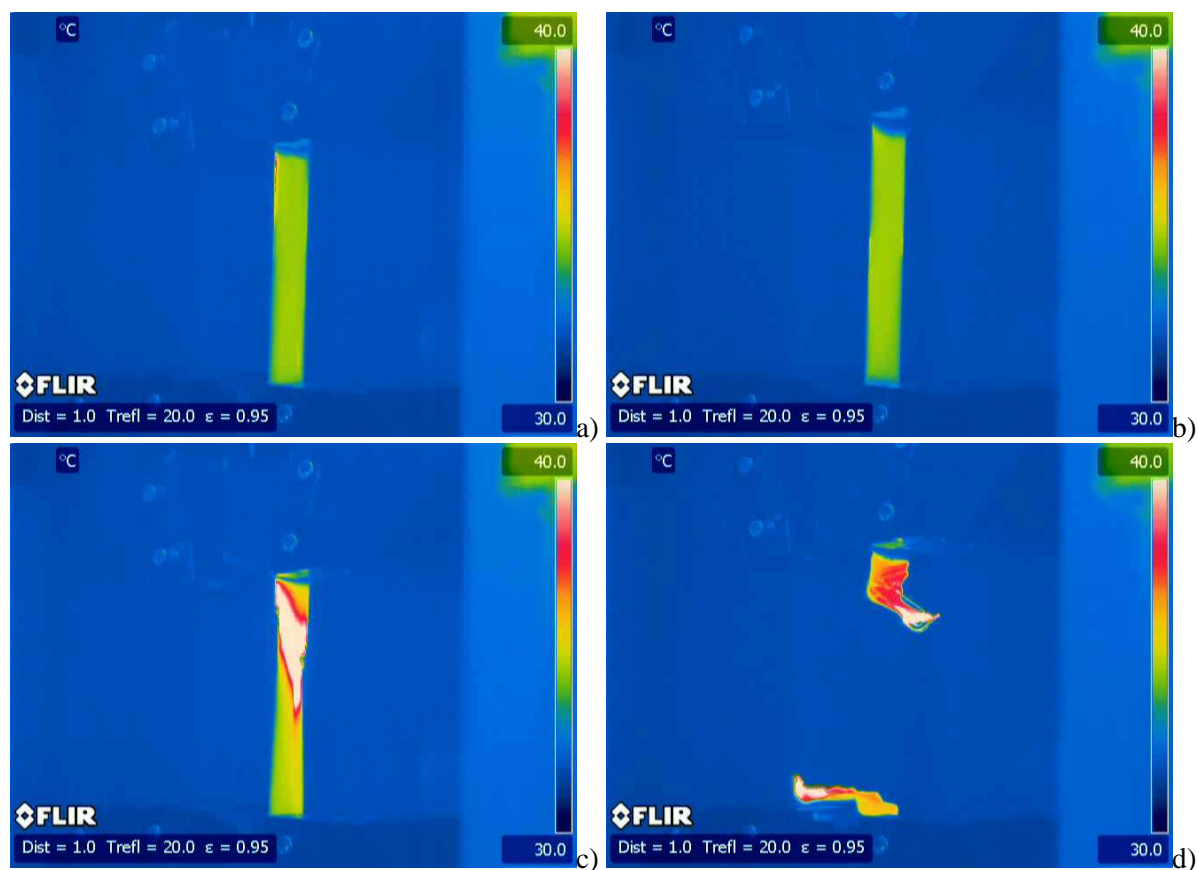


Figura 12: Sequenza di termogrammi durante la fase di rottura: a),c) tessuto non trattato; b),d) tessuto trattato MTO.